

Evaluación experimental de los límites de formabilidad en láminas de acero AISI 304 a través de sus propiedades intrínsecas

José Ricardo Rolón Arguello

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería
Ingeniería Industrial
Febrero 2022

Evaluación experimental de los límites de formabilidad en láminas de acero AISI 304 a través de sus propiedades intrínsecas

José Ricardo Rolón Arguello

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:

Ingeniero Industrial

Director:

Jhon Erickson Barbosa Jaimes

Ingeniero Mecánico

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería
Ingeniería Industrial
Febrero 2022

Resumen

En este trabajo se investigó por vía experimental la formabilidad de láminas de acero inoxidable utilizadas por la industria metalmeccánica en Colombia (en espesores de 0.9, 1.2 y 1.5 mm: calibres 20, 18 y 16 respectivamente), a través de su composición química, análisis metalográfico y algunas propiedades mecánicas. De acuerdo a sus elementos aleantes, los aceros en estudio se pueden clasificar como AISI 304L. En cuanto a las propiedades mecánicas derivadas del ensayo de tracción como la resistencia a la tracción promedio σ_u , límite elástico convencional promedio σ_y (0.2%), Alargamiento hasta fractura A50, todos los resultados están por encima de los límites mínimos establecidos para las láminas de acero AISI 304 Y AISI 304L de acuerdo a la norma ASTM A 240. (ASTM A 240, 2020). Respecto al exponente de endurecimiento por deformación, n , los datos son muy similares a los reportados por distintos autores. Finalmente, de las mediciones efectuadas se puede inferir que por su mayor espesor y resistencia a la fractura las láminas de calibre 16 tendrán una mayor formabilidad que las de calibre 18 y 20 respectivamente.

Palabras claves: Formabilidad, límites, acero, tracción, fractura

Abstract

In this experimentally investigated project is exposed the formability of stainless-steel sheets used by the metalworking industry in Colombia (thicknesses of 0.9, 1.2 y 1.5 mm: calibers 20, 18 and 16 respectively), through its chemical composition, metallographic analysis, and some mechanical properties. According to their alloying elements, the studied steels can be classified as AISI 304L. Regarding the mechanical properties derived from the tensile test such as the average tensile strength σ_u , average conventional yield strength σ_y (0.2%), elongation until

fracture A50, all results are above the minimum limits established for AISI 304 and AISI 304L steels sheets according to the ASTM A 240 standard. (ASTM A 240, 2020). Regarding the strain hardening exponent, n , the results are similar the ones reported by different authors. Finally, about the measurements made, it can be inferred that, the gauge sheets 16 will have greater formability than the 18 and 20 gauge respectively, because its greater thickness and fracture strength.

Keywords: Formability, limits, steel, tensile, fracture.

Contenido

	pág.
Lista de Figuras	7
Lista de Tablas	9
Introducción	10
1. Problema	11
1.1 Titulo	11
1.2 Planteamiento del problema	11
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo general	12
1.3.2 Objetivos específicos	12
1.4 Justificación de la Investigación	12
2. Marco Conceptual y Teórico	14
2.1 Problemas asociados con la conformación de láminas metálicas	14
2.2 Efecto de las propiedades del material en la formabilidad de la chapa	18
2.3 Distribución de las deformaciones	19
2.4 Tipos de ensayos de conformabilidad de la lámina metálica	21
3. Metodología	23
3.1 Composición Química	23
3.2 Estudio Metalográfico	23
3.3 Ensayo de Tracción	24
3.3.1 Determinación de las propiedades de tracción	25
3.3.2 Limite elástico σ_y	25

3.3.3 Resistencia a la tracción, σ_u	27
3.3.4 Alargamiento, A50	28
3.3.5 Exponente de Endurecimiento por Deformación, n	29
3.3.6 Coeficiente de anisotropía normal, r	29
4. Materiales de partida	31
5. Resultados y Discusión	36
5.1 Composición química de los aceros	36
5.2 Metalografía de los aceros	38
5.3 Propiedades a tracción	40
5.3.1 Limite elástico convencional, σ_y (0,2%), y Resistencia a la tracción, σ_u	40
5.3.2 Alargamiento hasta fractura, A50	41
5.3.3 Exponente de endurecimiento por deformación, n	46
Conclusiones	48
Recomendaciones	50
Referencias Bibliográficas	

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Montaje de láminas de aluminio sobre la mesa del centro de mecanizado. Se puede observar el corte en orientaciones de 0° y 45° con respecto a la dirección de la última laminación.	24
Figura 2. Geometría y dimensiones de la probeta plana para tracción, tipo A. (ASTM E 8M), unidades en milímetros.	26
Figura 3. Montaje de la probeta entre las mordazas.	27
Figura 4. Diagrama esfuerzo – deformación para la determinación del límite de fluencia por el método de corrimiento (Off set).	28
Figura 5. Anisotropía normal y planar.	30
Figura 6. Certificado de calidad de la lámina de 0.9 mm adquirida a la empresa WESCO S. A	34
Figura 7. Certificado de calidad de la lámina de 1.2 mm adquirida a la empresa WESCO S. A	34
Figura 8. Certificado de calidad de la lámina de 1.5 mm adquirida a la empresa WESCO S. A	35
Figura 9. Fotomicrografías del acero inoxidable 304 calibre 16, ataque con HCl Y H2O2. (a) 100 aumentos y ataque por 5 segundos y (b) 500 aumento ataque por 3 segundos.	38
Figura 10. Fotomicrografías del acero inoxidable 304 calibre 18, ataque con HCl Y H2O2. (a) 100 aumentos y ataque por 5 segundos y (b) 500 aumento ataque por 3 segundos.	38
Figura 11. Fotomicrografías del acero inoxidable 304 calibre 20, ataque con HCl Y H2O2. (a) 100 aumentos y ataque por 5 segundos y (b) 500 aumento ataque por 3 segundos.	39

- Figura 12. Diagrama comparativo entre la resistencia a la tracción y el porcentaje de alargamiento para la lámina de acero AISI 304 Calibre 16, según la orientación de las muestras. 44
- Figura 13. Diagrama comparativo entre la resistencia a la tracción y el porcentaje de alargamiento para la lámina de acero AISI 304 Calibre 18, según la orientación de las muestras. 44
- Figura 14. Diagrama comparativo entre la resistencia a la tracción y el porcentaje de alargamiento para la lámina de acero AISI 304 Calibre 20, según la orientación de las muestras. 45
- Figura 15. Diagrama comparativo entre valores promedio de la resistencia a la tracción y el porcentaje de alargamiento para la lámina de acero AISI 304 para los calibres 16, 18 y 20. 45

Lista de Tablas

pág.

Tabla 1. Niveles de composición química del acero 304 según la norma ASTM A240.	32
Tabla 2. Propiedades físicas del acero 304 en estado de recocido según la norma ASTM A240 y A666.	33
Tabla 3. Análisis químico mediante EOS de los aceros en estudio.	36
Tabla 4. Propiedades mecánicas del acero 304 según la norma ASTM A240 y A466.	39
Tabla 5. Límite elástico y resistencia a la tracción para los tres espesores de lámina.	40
Tabla 6. Valores del alargamiento hasta fractura para los tres espesores de lámina.	42
Tabla 7. Valores del exponente de endurecimiento por deformación para los tres espesores de lámina.	46

Introducción

En este trabajo se ejecutó un procedimiento experimental para determinar las propiedades mecánicas de las láminas de acero inoxidable utilizadas por la industria metalmeccánica en Colombia. El método consiste en determinar los límites de formabilidad de láminas de acero AISI 304. El primer paso fue la caracterización química y un análisis metalográfico. Posteriormente se consiguieron la resistencia a la tracción y el límite elástico convencional por medio de ensayos de tracción normalizados. Una idea de la ductilidad se estableció con la medición del alargamiento hasta fractura. Una propiedad importante para operaciones de embutido se estableció por medio de ensayos que permitieron determinar el coeficiente de anisotropía, r . Por último, La capacidad del material importante en operaciones de estirado se estableció mediante el coeficiente de endurecimiento por deformación, n . Todos los ensayos mecánicos bajo normas ASTM.

Estas propiedades son de gran interés técnico y económico para la industria manufacturera, debido a que les permite darse una idea del comportamiento de la chapa en operaciones de embutido y estirado.

Problema

Título

Evaluación experimental de los límites de formabilidad en láminas de acero AISI 304 a través de sus propiedades intrínsecas

Planteamiento Del Problema

La caracterización experimental de la formabilidad de una lámina metálica es muy compleja. Está en realidad depende de factores intrínsecos como la anisotropía, tamaño de grano, resistencia y ductilidad entre otros. Pero también de factores externos como el tipo de proceso de manufactura al cual estará sometida la chapa.

Generalmente, el conformado de la lámina es llevado a cabo por fuerzas de tracción en el plano de la misma. Esto produce cambios en el espesor debido al alargamiento a que es sometido el metal. Sin embargo, debe evitarse la disminución excesiva del espesor, ya que esto conllevaría al encuelleamiento y rotura. De esta manera, en el trabajado de la chapa resulta de gran importancia la capacidad del metal para sobrellevar el cambio de forma deseado sin fallar. Esto resulta en una propiedad de gran importancia tecnológica conocida como formabilidad o conformabilidad. Ésta a su vez es influenciada por diversos factores como las propiedades mecánicas, microestructura, composición, etc.

Con base en lo anteriormente descrito, éste trabajo pretende realizar un procedimiento experimental para determinar las propiedades mecánicas intrínsecas de láminas de acero inoxidable AISI 304 utilizadas por la industria metalmecánica en Colombia, con el fin de que puedan predecir el comportamiento en sus diferentes procesos de estampado y embutido.

Objetivos

Objetivo General.

Evaluar las propiedades mecánicas intrínsecas del acero AISI 304 utilizados por el sector metalmeccánico en Colombia, con el fin de identificar los límites de formabilidad.

Objetivos Específicos.

Son los siguientes:

- Obtener la composición química de elementos aleantes presentes en la estructura de las láminas objeto de estudio.
- Realizar estudio metalográfico de las láminas objeto de estudio.
- Identificar las propiedades mecánicas intrínsecas tales como: Resistencia a la tracción, (σ_u), límite elástico convencional, (σ_y) (0.2%), alargamiento hasta fractura, A50, exponente de endurecimiento por deformación, (n), y el coeficiente de anisotropía normal, (r); presentes en las láminas objeto de estudio.
- Realizar la evaluación de los resultados de acuerdo a la teoría y otros autores.

Justificación De La Investigación

En el país existen diversas empresas del sector metalmeccánico que se dedican a la fabricación en serie de piezas metálicas, para muchas aplicaciones, usando procesos de manufactura de la chapa, tales como, embutido, doblado y estampado. La materia prima requerida, en este caso láminas, es normalmente producida por la industria nacional o

internacional. Sin embargo, también es conocido que, salvo excepciones, no se cuenta con suficiente información técnica respecto del material y, rara vez, de sus límites operacionales.

El propósito fundamental de este trabajo es que los resultados puedan ser utilizados por las distintas industrias metalmeccánicas, en el sentido que sirvan de referencia para la mejora continua en la productividad y calidad de los productos obtenidos en procesos de manufactura como el embutido y estampado de chapa de acero inoxidable.

Marco Conceptual Y Teórico

La Conformabilidad o formabilidad es la medida de cuanto puede deformarse un material antes de fracturarse o sufrir encuellamiento. Desafortunadamente, la “formabilidad” no se puede definir con una sola propiedad del material, ésta depende entre otras, del proceso de manufactura al que es sometida la lámina (embutido y/o estampado) y el espesor de la chapa (ASM international, 1996).

La conformación de la lámina metálica es el proceso de transformar una chapa plana de metal en la forma que se desee, sin que se produzca falla (fractura o adelgazamiento en exceso). El proceso puede ser simple, por ejemplo, un doblado, o una secuencia de operaciones muy complejas como aquellas realizadas en fábricas para producir altos volúmenes de piezas por estampas (ASM international, 1996).

Las operaciones de conformación de la lámina metálica son tan diversas en tipo, magnitud y velocidad que ningún ensayo simple proporciona una indicación exacta de la conformabilidad de un material en todas las situaciones. Sin embargo, el conocimiento de las propiedades del material y el análisis cuidadoso de la variedad de tipos de conformación, que comprende la fabricación de una pieza específica, son indispensables en determinar la probabilidad de producir una pieza exitosamente, y en desarrollar el proceso más eficientemente (ASM international, 1996).

Problemas Asociados Con La Conformación De Láminas Metálicas:

Entre los principales problemas que resultan de la conformación de láminas de chapa metálica se hallan: fractura, alabeo -encorvamiento- y arrugado, distorsión de la forma,

aflojamiento del metal y texturas superficiales indeseables. La ocurrencia de una o más de estas condiciones puede hacer que la pieza metálica resulte inutilizable. Los efectos de estos problemas se discuten a continuación:

Fractura: Ésta ocurre cuando la chapa metálica de trabajo (blank) es sometida a fuerzas de estirado o cizalladura que exceden los límites de fallo del material para un historial de deformación dado, estado de deformación y temperatura. En operaciones de estirado, la chapa inicialmente adelgaza uniformemente, al menos en un área local. Eventualmente, se alcanza un punto en el que la deformación se concentra y causa una región de adelgazamiento localizado conocido como encuellamiento, que finalmente fractura. La formación del encuellamiento, generalmente, se considera un fallo, ya que esto produce un defecto visible y una debilidad estructural. La mayoría de los ensayos de conformabilidad actuales se refieren a la fractura que ocurre en las operaciones de estirado (ASM international, 1996).

Por su parte, en operaciones de cizallamiento, la fractura puede ocurrir sin adelgazamiento previo. El ejemplo más común de este tipo de fractura ocurre en ranurado, punzonado y recortado. En estas operaciones, las chapas son cortadas por filos de herramientas que aplican fuerzas normales al plano de la chapa. Los fallos por cizallamiento son en ocasiones producidos en operaciones de estampado por fuerzas cortantes en el plano de chapa, pero son menos comunes que los fallos por estirado (ASM international, 1996).

Alabeo y arrugado: En una operación típica de estampado, el punzón hace contacto con la chapa de trabajo (blank), la estira y, subsiguientemente, comienza a arrastrarla a través de la prensa chapa. Los bordes de las chapas son tirados a regiones con perímetros progresivamente más pequeños. Estos producen esfuerzos compresivos en la dirección circunferencial. Si estos

esfuerzos alcanzan un nivel crítico característico del material y de su espesor entonces causan ondulaciones leves; fenómeno que se conoce como alabeo o pandeo (buckles). Éstas, a su vez, pueden desarrollar ondulaciones más pronunciadas, si la presión de la prensa chapa no es suficientemente alta, originando ondas o arrugas (wrinkles), (ASM international, 1996).

Este efecto, también, puede causar arrugamiento en otros sitios, particularmente, en regiones con cambios bruscos en sección y donde el metal está sin apoyo o recostado sobre un sólo lado. En casos extremos, pueden desarrollarse pliegues dobles o triples de metal. Éstos pueden a su vez producir agrietamiento en otras regiones por restringir el flujo de metal o por trabar el estirado del metal. Por tanto, el aumento de la presión de la prensa chapa con frecuencia corrige el problema de agrietamiento (ASM international, 1996).

Distorsión de la forma: En las operaciones de conformación, el metal es deformado elástica y plásticamente por las fuerzas aplicadas. Al suprimir las fuerzas externas las tensiones elásticas internas se relajan. En algunas regiones, las tensiones pueden relajarse completamente con sólo un cambio muy leve en las dimensiones de la pieza. Sin embargo, en las áreas que han sido sometidas a doblado tendrán lugar gradientes de esfuerzos elásticos a través del espesor; esto es, las tensiones del lado de la superficie externa serán diferentes de aquellas producidas en la superficie interior (ASM international, 1996).

Si estas tensiones no están constreñidas o atrapadas por la geometría de la pieza, la relajación causará un cambio en la forma de la pieza conocida como distorsión de forma o efecto de resorte (springback). Este problema se puede corregir por un diseño de la matriz que tome en cuenta las propiedades específicas del material, pero puede aún ser un inconveniente si hay

grandes variaciones en las propiedades del material o del proceso de chapa a chapa (ASM international, 1996).

Aflojamiento del metal: Ocurre en regiones indeformadas y es indeseable, porque estas pueden fácilmente ladearse. Esto puede ilustrarse en el encapsulado de aceite, un fenómeno comúnmente referido, en el que el área local puede ser bien cóncava o convexa. En piezas estampadas con dos o más dobleces agudos del mismo signo en aproximadamente la misma dirección, tal como un par de líneas características, entre ellas el metal tiende a aflojarse debido a la dificultad impuesta de tirar del metal a través de un radio agudo (ASM international, 1996).

En ocasiones es posible evitar este problema asegurándose de que el metal no este sujetado por ambas líneas al mismo tiempo; de modo, que algún estiramiento puede tener lugar antes que la segunda línea sea fijada. Hay una tendencia a que ocurra el aflojamiento del metal hacia el centro de piezas grandes, planas o curvadas levemente. El aumento de las fuerzas restrictivas sobre los bordes de la chapa usualmente mejora esta condición (ASM international, 1996).

Texturas superficiales indeseables: La chapa metálica fuertemente deformada, particularmente, si es grano basto, con frecuencia desarrolla una textura superficial tosca conocida popularmente como cáscara de naranja. Esto es normalmente inaceptable en piezas que son visibles en servicio. Otra fuente de problemas superficiales ocurre en metales que tienen un alargamiento pronunciado en el punto de fluencia, esto es, materiales que estiran diversos porcentajes sin un aumento perceptible de la carga después de fluir. En estos metales, la deformación a niveles de deformación bajos se concentra en bandas irregulares conocidas como líneas de Lüders. Estos defectos desaparecen a niveles de deformación moderados y altos. Sin

embargo, casi todas las piezas tienen algunas regiones de deformación baja. Estos defectos son antiestéticos y no son encubiertos por pintado. Los aceros calmados envejecidos y algunas aleaciones base aluminio- magnesio desarrollan severas líneas de Lüders. En algunos casos, los aceros galvanizados exhiben defectos superficiales conocidos como lentejuelas. Este fenómeno ocurre solamente en productos sumergidos en caliente y es causado por el desarrollo de un tamaño de grano basto durante el recubrimiento galvánico, lo cual hace que los granos individuales sean claramente visibles. Este problema se puede corregir durante el proceso de recubrimiento. En adición a las ocurrencias que se acaban de mencionar, la manipulación indebida, abolladuras causadas por suciedad o astillas en la matriz, y ralladuras o desgaste por fricción causado por una superficie tosca de la matriz o lubricación inadecuada a veces producen superficies inaceptables (ASM international, 1996).

Efecto De Las Propiedades Del Material En La Formabilidad De La Chapa:

Las propiedades de la chapa metálica varían considerablemente dependiendo del metal base, elementos de aleación presentes, procesado, tratamiento térmico, espesor y nivel de trabajo en frío. Al seleccionar un material para una aplicación particular, un compromiso debe establecerse entre las propiedades que requiere la pieza y las propiedades de conformación de los materiales disponibles. Para que el material tenga una buena conformabilidad en varias aplicaciones, el material de trabajo debe poseer las siguientes características:

- Distribuir la deformación uniformemente.
- Alcanzar niveles de deformación altos sin encuellar o fracturar.
- Soportar esfuerzos compresivos en el plano sin arrugarse.

- Soportar esfuerzos de cizalladura en el plano sin fracturar.
- Conservar la forma de la pieza luego de ser expulsada de la matriz.
- Conservar una superficie lisa y que resista el daño superficial. (ASM international, 1996).

Algunos procesos de producción pueden ser exitosamente realizados sólo cuando las propiedades de conformación del material de trabajo están dentro de un rango estrecho. Más corrientemente, los procesos son adecuados para ajustarse a las variaciones en las propiedades del material de trabajo de un rango a otro, aunque algunas veces al coste de una producción más baja y a mayores pérdidas de material. En general, la consistencia en las propiedades de conformación del material de trabajo es un factor importante al producir piezas de alta precisión dimensional (ASM international, 1996).

Distribución De Las Deformaciones:

Tres propiedades del material determinan la distribución de la deformación en una operación de conformado:

- El exponente de endurecimiento por deformación n .
- La sensibilidad a la velocidad de deformación m .
- El coeficiente de anisotropía normal r . (ASM international, 1996).

La habilidad para distribuir la deformación uniformemente depende de los factores n y m . La habilidad de alcanzar altos niveles de deformación total depende de muchos factores, tales

como el material base, elementos aleantes, valor n, valor m, valor r, espesor, uniformidad, y vacantes por defectos e inclusiones (ASM international, 1996).

Un alto valor n, revela una gran diferencia entre el esfuerzo de fluencia y la resistencia última de un material. Lo anterior es un indicador de buena formabilidad en operaciones de estirado (ASM international, 1996).

Un valor m, o sensibilidad a la velocidad de deformación positivo indica un incremento en el flujo de esfuerzo con respecto a la deformación. Esto tiene dos consecuencias. La primera, altos esfuerzos son requeridos para formar partes a altas velocidades de deformación. La segunda, a una velocidad de deformación dada, el material soporta deformación adicional en regiones que serán estiradas más rápidamente que otras regiones adyacentes aumentando el flujo de esfuerzo en esas regiones. Esto ayuda a distribuir las deformaciones más uniformemente. Altos valores de factor n y m conducen a una buena formabilidad en operaciones de estirado, pero tienen poco efecto en la capacidad de embutido (ASM international, 1996).

El valor r o coeficiente de anisotropía normal está definido como la relación entre la deformación verdadera en la dirección del ancho ϵ_w , dividido por la deformación verdadera en el ϵ_t . Puede ser medido en un ensayo de tracción con una probeta plana (ASM international, 1996).

El factor r es un índice de la resistencia del material al angostamiento. Un alto valor está relacionado con la buena capacidad del material para ser embutido. En esta operación el material es estirado en una dirección (radial) y comprimido en dirección perpendicular (circunferencial). (ASM international, 1996).

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_o}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_o}\right)} \quad (1)$$

Cada tipo de acero, aluminio, u otro tipo de lámina metálica se puede deformar solo a cierto nivel antes de que ocurra estricción local y fractura. Estos niveles dependen principalmente de la combinación de deformaciones, esto es, la relación de mayor y menor deformación. El nivel más bajo ocurre cuando la deformación menor es cero. Esta información puede ser representada gráficamente en un Diagrama Límite de Conformado, que será explicado en detalle más adelante (ASM international, 1996).

Tipos De Ensayo De Conformabilidad De La Lámina Metálica:

En cuanto a los tipos de ensayos de conformabilidad de lámina metálica Casadiego nos afirma que:

“Los ensayos que miden la conformabilidad se dividen en dos tipos básicos: intrínsecos y simulativos. Los ensayos intrínsecos miden las propiedades básicas del material que pueden relacionarse con su conformabilidad. Por otro lado, los ensayos simulativos someten el material a deformación que se asemeja estrechamente a la deformación que ocurre en una operación de conformación real”.

“Los ensayos intrínsecos proporcionan información global que es insensible al espesor y condición superficial del material. El más importante y ampliamente usado es el ensayo

de tracción uniaxial ASTM E8, el cual provee valores de muchas propiedades del material para un amplio rango de operaciones de conformación”.

“Los ensayos simulativos proporcionan información específica y limitada que es normalmente sensible al espesor, condición superficial, lubricación, geometría y tipo de herramienta. Esta información se relaciona a sólo un tipo de operación de conformación” (Casadiego et al., 2017).

Algunos ensayos simulativos, tales como el ensayo de deformación con punzón de bola se han utilizado ampliamente durante mucho tiempo con buena correlación a casos específicos de producción. A continuación, se describen los métodos que se emplean en general, en la industria, para pronosticar la facilidad de conformación de chapa (Casadiego et al., 2017).

En este trabajo sólo se realizaron ensayos intrínsecos.

Metodología

Se describen los ensayos de caracterización de las láminas que determinarán la conformabilidad de las mismas, tales como: metalografía, composición química y ensayo de tracción.

Composición Química:

La determinación cuantitativa de los elementos aleantes presentes en la composición de las láminas será determinada usando un espectrómetro de emisión óptica (OES, Optical emission Spectrometer).

Se trata de un equipo fijo que trabaja produciendo una chispa en el metal. Esta chispa hace que los electrones de los elementos que componen el metal salten y produzcan la liberación de un fotón de energía, el cual es leído en el equipo y reflejado como porcentaje de cada elemento, después de compararlo con dos patrones, uno de referencia y uno de calibración.

Estudio Metalográfico:

En este apartado se describe el método de preparación de muestras metalográficas, en conformidad con la norma ASTM E 3 que lleva por título “Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens” (ASTM E 3, 2011).

El objetivo de este método es revelar los constituyentes a nivel microestructural del metal, a través del microscopio óptico.

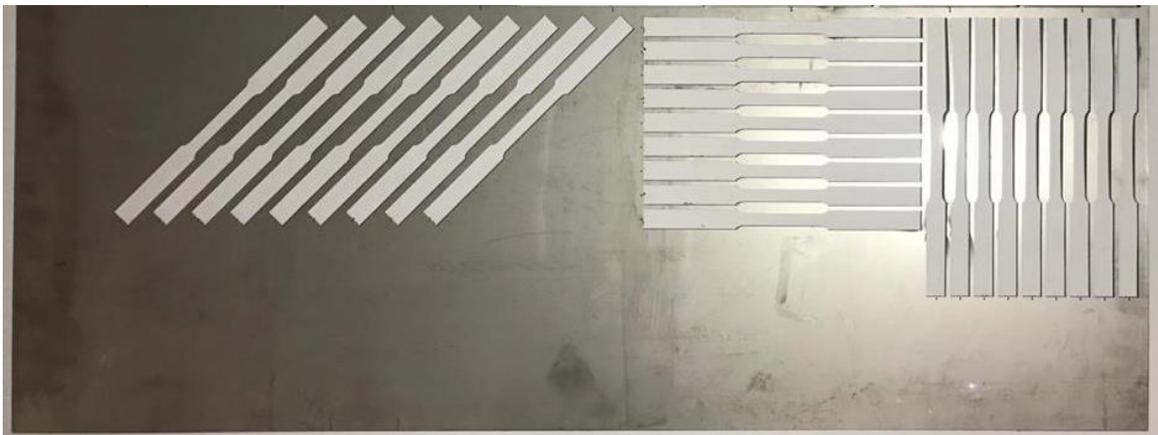
Ensayo de Tracción:

Este apartado trata de aspectos relacionados con el ensayo de tracción que serán realizados a temperatura ambiente y, específicamente, lo concerniente a la preparación de las probetas planas y el método de determinación del límite elástico (σ_y), resistencia a la tracción (σ_u), y alargamiento (A).

Preparación de las probetas:

- Las probetas para este ensayo serán fabricadas en un centro de mecanizado CNC.
- Para tal propósito será necesario realizar un montaje debido al poco espesor de las láminas, con el fin de poder sujetarlas una por una al maquinarse. Figura 1.
- Se fabricarán probetas con orientaciones con respecto de la última laminación de 0° , 45° y 90° , con la geometría indicada en la figura 1.

Figura 1. Montaje de láminas de aluminio sobre la mesa del centro de mecanizado. Se puede observar el corte en orientaciones de 0° y 45° con respecto a la dirección de la última laminación.



Determinación De Las Propiedades De Tracción:

El método a seguir para determinar las propiedades mecánicas que se derivan del ensayo de tracción corresponde al especificado en la norma ASTM E 8M antes mencionada. Las propiedades mecánicas de mayor interés para la investigación serán: Límite elástico (σ_y), resistencia a la tracción (σ_u), coeficiente de endurecimiento por deformación (n) y alargamiento (A). Se realizarán 3 ensayos por cada espesor de lámina. Los valores obtenidos serán promediados para cada propiedad, y para cada espesor.

Las propiedades a tracción serán calculadas a partir de los datos obtenidos por la máquina universal de ensayos de tracción/compresión.

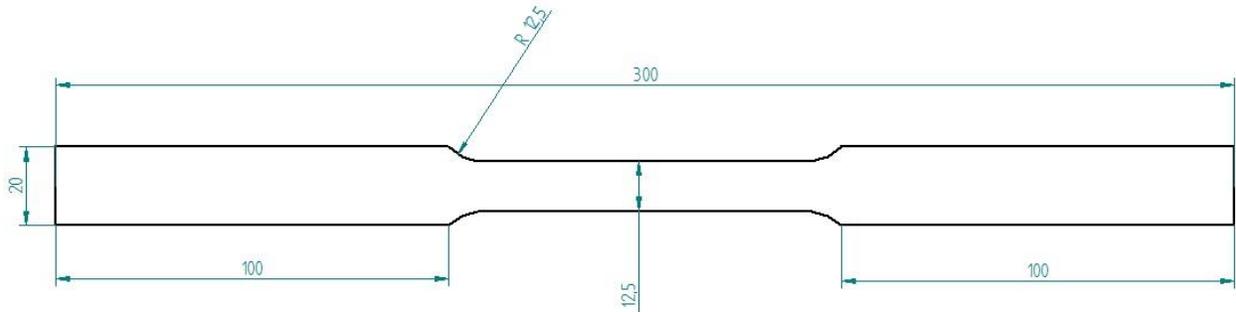
Previo a la realización de los ensayos de tracción se establecerán las condiciones de realización de los mismos en lo relativo, principalmente, a la velocidad del ensayo y criterio de rotura.

Límite Elástico σ_y :

Para la determinación del límite elástico se procederá como sigue:

La probeta plana se fijará en las mordazas de la máquina de tracción, como se observa en la Figura 3. Los datos iniciales de la probeta serán introducidos al sistema de adquisición de datos y control del ensayo de tracción tales como: Espesor inicial (e_o), ancho inicial (w_o) y longitud calibrada inicial (L_o). Se ejecutará la rutina del ensayo de tracción conforme a los parámetros de la máquina previamente establecidos. Tras el ensayo se determinará la longitud final (L_f), espesor (e_f) y ancho final (w_f) de la zona calibrada donde tenga lugar la rotura de la probeta. Dichos datos serán introducidos en el programa, para actualizar los resultados obtenidos.

Figura 2. Geometría y dimensiones de la probeta plana para tracción, tipo A. (ASTM E 8M), unidades en milímetros.



Los resultados primarios que se obtendrán tras el ensayo de tracción son, básicamente, valores de carga (en Newton) y sus correspondientes valores de alargamiento (en milímetros). A partir de estas parejas de datos se realizará el trazado de la curva de ingeniería esfuerzo vs deformación usando una hoja de cálculo de Excel. El esfuerzo (σ) y la deformación de ingeniería (ϵ) se obtendrán de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

Donde, F es la carga aplicada en N y A_0 es el área transversal inicial., por su parte, δ es el cambio de longitud (δ) respecto de la longitud inicial, l_0 .

$$\epsilon = \frac{\delta}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (3)$$

Siendo l la longitud instantánea, que corresponde a la carga instantánea F.

Figura 3. Montaje de la probeta entre las mordazas (Barbosa, J. E., 2008).



Sobre la curva esfuerzo vs deformación se empleará el criterio de la tangente a la curva en la zona elástica lineal. Este consiste en trazar una recta paralela a dicho tramo lineal a una deformación de 0.002 mm/mm (0.2%). En el punto de intersección con la curva se traza una recta paralela al eje de las abscisas, siendo el valor leído en el eje de las ordenadas el esfuerzo de fluencia, como se ilustra en la figura 4.

Resistencia A La Tracción, σ_u :

La resistencia a la tracción se obtendrá al dividir la carga máxima, a que es sometida la probeta durante el ensayo, entre el área transversal inicial de la probeta.

$$\sigma_u = \frac{F_{max}}{A_o} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_o}$$

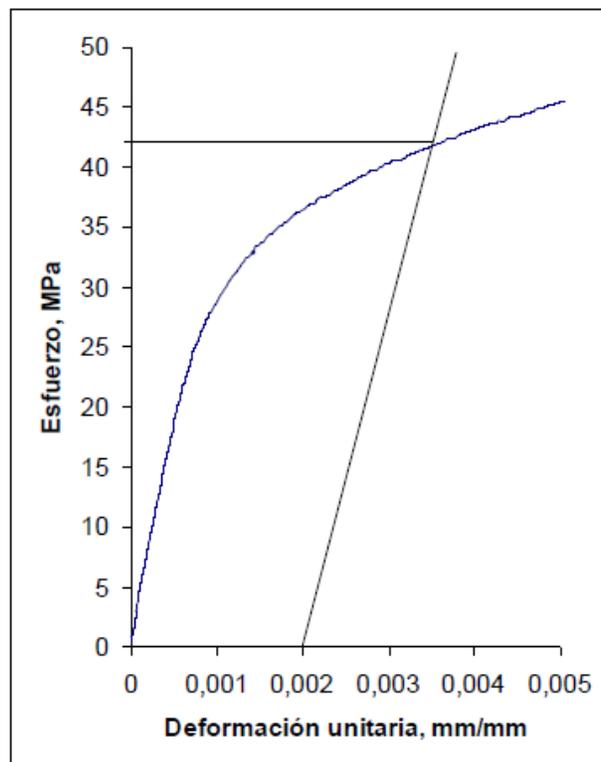
Alargamiento, A₅₀:

Tras el ensayo de tracción se unirán las 2 superficies de fractura de la probeta y se medirá la distancia entre las marcas de calibración (L_f). El alargamiento en porcentaje se obtendrá de la siguiente ecuación:

$$A_{50} = \frac{l_f - l_0}{l_0} * 100\% \quad (5)$$

Dónde: l₀ es la longitud inicial de calibración igual a 50 mm, y L_f es la longitud final entre marcas de calibración.

Figura 4. *Diagrama esfuerzo – deformación para la determinación del límite de fluencia por el método de corrimiento (Off set), (Barbosa, J. E.,2008).*



Exponente De Endurecimiento Por Deformación, n:

Para determinar el coeficiente de endurecimiento por deformación, n, se seguirán las especificaciones dadas por la norma ASTM E 646 que lleva por título “Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials”. Dicho exponente n fue calculado a partir de una representación matemática empírica de la curva esfuerzo real vs deformación real, sustraída del ensayo de tracción uniaxial. La representación matemática utilizada en este método aplica para metales cuyo comportamiento plástico se asimila a una curva potencial de la forma:

$$\sigma_r = k * \varepsilon^n \quad (6)$$

Dónde:

σ_r = Esfuerzo real.

ε = Deformación real.

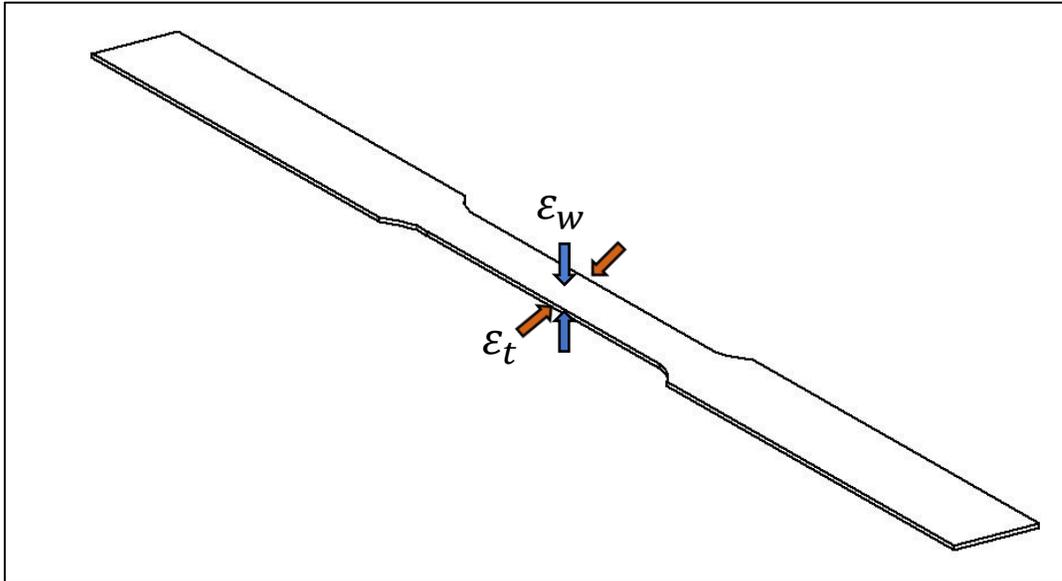
k = Coeficiente de resistencia.

n = Exponente de endurecimiento por deformación.

Coefficiente De Anisotropía Normal, r:

Para determinar el coeficiente de anisotropía, r, se seguirán las especificaciones dadas por la norma ASTM E 517– 00. Que lleva por título “Standard Test Methods for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal”.

Figura 5. Anisotropía normal y planar.



$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln \frac{w_f}{w_o}}{\ln \frac{t_f}{t_o}} \quad (7)$$

$$r_m = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4} \quad (8)$$

$$\Delta_r = \frac{(r_0 - 2r_{45} + r_{90})}{2} \quad (9)$$

Materiales De Partida

El 304 es el acero inoxidable austenítico más utilizado en la industria, sus principales aleantes son el cromo y el níquel que estabilizan la fase austenita hasta temperatura ambiente. El acero 304 trabajado en frío tiene propiedades magnéticas, pero una vez recocido normalmente tiene carácter no magnético. Este material tiene una buena relación entre resistencia y facilidad de fabricación.

La composición química del acero 304 está definida en la norma ASTM A240, tal como se observa en la Tabla 1. Y sus propiedades físicas según la norma ASTM A240 y A666, tal como se muestra en la Tabla 2.

Para esta investigación se seleccionaron láminas de acero inoxidable AISI 304 en espesores de 0.9, 1.2 y 1.5 mm (calibres 20, 18 y 16 respectivamente). Los certificados de calidad se muestran en parte en las figuras 6 y 7.

A partir de estas láminas se maquinaron las probetas necesarias para realizar la serie de ensayos de composición química, estudio metalográfico, pruebas de tracción y ensayos simulativos de embutido. Todo lo anterior bajo las normas ASTM que se describirán en los siguientes apartados.

Tabla 1. *Niveles de composición química del acero 304 según la norma ASTM A240.*

Elemento	Niveles (%)	Tipo 304L
Carbono	0.07 máx.	0.030 máx.
Manganeso	2.00 máx.	2.00 máx.
Azufre	0.030 máx.	0.030 máx.
Fósforo	0.045 máx.	0.045 máx.
Silicio	0.75 máx.	0.75 máx.
Cromo	17.5 a 19.5	18,0 a 20,0
Níquel	8.0 a 10.5	8.0 a 12.0
Nitrógeno	0.10 máx.	0.10 máx.

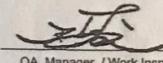
Tabla 2. *Propiedades físicas del acero 304 en estado de recocido según la norma ASTM A240 y A666.*

	Condiciones	304 y 304L
Densidad (libra/ pulg.^2) a RT		0.29
Módulo de elasticidad en tensión (psi x 10^6)		28.0
Calor específico (BTU/o F/libra)	32 a 212 °F (0 a 100 °C)	0.12
Conductividad térmica (BTU/h/pies^2/pies)	212 °F	9.4
	932 °F (500 °C)	12.4
Coeficiente promedio de expansión térmica (pulg. x 10^-6 por o F)	32 a 212 °F (0 a 100 °C)	9.2
	32 a 600 °F (0 a 316 °C)	9.9
	32 a 1000 °F (0 a 538 °C)	10.2
	32 a 1200 °F (0 a 649 °C)	10.4
Resistencia eléctrica (microhomios por cm)	a 70 °F (21 °C)	72
Rango de punto de fusión (°F)		2550 a 2650
Resistencia a la oxidación: Servicio continuo (°F)		1,650
Resistencia a la oxidación: Servicio intermitente (°F)		1,500

Figura 6. Certificado de calidad de la lámina de 0.9 mm adquirida a la empresa WESCO S.A

BAHRU STAINLESS		INSPECTION CERTIFICATE 3.1 ACCORDING TO EN 10204			
MANUFACTURER'S MARK		CERTIFICATE NO	Rev	ISSUE DATE	
BHS		268816	1	2019-12-27	
INSPECTOR'S STAMP		MELTING PROCESS		EAF, AOD	
CUSTOMER		ORDER No.	ITEM No.	DELIVERY NOTE No.	
WESCO S.A AVENIDA CALLE 63, NO.74 B-42 BODEGA 6 PARQUE EMPRESARIAL NORMANDIA. Colombia		BE10691	24	DEL079188	
		CUSTOMER ORDER No. CONF151119			
		REQUIREMENTS			
SPECIFICATIONS		MATERIAL GRADE	CASE MATERIAL	MASS	
ASTM A240 / A340M-16a		304L 304	BPC2192671 A6075080BA01 BPC2192672 A6075080BA02	2484 Kg 2497 Kg	
		ASOCIACION COLOMBIANA PARA EL AVANCE ENTREGA 303984 WESCO S A			
TOLERANCE ASTM A480/A480M		HEAT No.		TYPE	
No. 2B		A05201			
PRODUCT		QUANTITY		TOTAL MASS	
Cold rolled, heat treated, pickled & skin passed		240		4981 Kg	
		DIMENSIONS 0.9 mm x 1219 mm x 2438 mm			

Figura 7. Certificado de calidad de la lámina de 1.2 mm adquirida a la empresa WESCO S.A

Certificate No. F190927004		Date: SEP 23, 2019		P 1001-02 P 1002-02		 彰源企業股份有限公司 FROCH ENTERPRISE CO., LTD.										
Customer: WESCO S.A		Contract No. 20191750+20191751		L/C No.		Specification: ASTM A240-2017/A480-2018										
Invoice No. FEX20191750.2		T/T		Quantity		Page: 1 of 4										
Description		Size		Type		Heat No.										
STAINLESS STEEL COLD ROLLED SHEET AND COIL: ASTM A240-2017/A480-2018, 430, 304, 316L, 2B FINISH WITH PAPER INTERLEAVED OR COATED ONE LAYER PE ON MAIN SIDE, NO.4 FINISH COATED ONE LAYER PE ON MAIN SIDE, COIL ID: 508MM, SLIT EDGE, PRIME QUALITY, FOR GENERAL APPLICATIONS, PE: 100 MICRON BLACK/WHITE PROTECTIVE FILM.		1.2MMX1220X2440MM 2B PE		304		ACK050106										
		1.2MMX1524X3048MM 2B PE		304		ACN050585										
		1.2MMX1524X3048MM 2B PE		304		ACN050012										
		1.2MMX1524X3048MM 2B PI		304		ADC050409										
		1.2MMX1524X3048MM 2B PI		304		ADJ050110										
		1.2MMX1524X3048MM 2B PI		304		ADM050059										
		1.2MMX1524X3048MM 2B PI		304		AOS050012										
		1.2MMX1220X2440MM 2B PI		304		AOS050057										
		1.2MMX1524X3048MM 2B PI		304		ADJ050552										
		1.2MMX1524X3048MM 2B PI		304		ALT050272										
Chemical Composition (%)		Mechanical Test		Direction		Hardness HB										
Item No.	C	SI	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Tensile (N/mm ²)	0.2% Yield (N/mm ²)	Elongation	Direction	Wash of specimen	Gauge Length	Hardness HB
Min.	0.075	0.750	2.00	0.045	0.030	19.50	10.50		0.100	515.00	205.00	40.00	LT	mm	mm	
1	0.025	0.980	1.58	0.033	0.002	18.38	8.02		0.061	677.00	317.00	54.00				82.00
2	0.018	0.410	1.43	0.028	0.002	18.18	8.03		0.055	634.00	277.00	53.00				87.00
3	0.023	0.480	1.46	0.034	0.002	18.24	8.05		0.061	655.00	276.00	55.00				84.00
4	0.019	0.340	1.16	0.039	0.002	18.21	8.06		0.042	624.00	307.00	54.00				84.00
5	0.017	0.390	1.39	0.027	0.004	18.35	8.03		0.058	669.00	293.00	51.00				87.10
6	0.017	0.410	1.39	0.030	0.002	18.27	8.03		0.055	658.00	297.00	53.00				87.00
7	0.023	0.480	1.46	0.034	0.002	18.24	8.05		0.061	655.00	276.00	55.00				84.00
8	0.020	0.410	1.39	0.030	0.002	18.20	8.03		0.065	665.00	305.00	53.00				85.00
9	0.022	0.370	1.42	0.032	0.002	18.26	8.04		0.040	671.00	314.00	51.00				86.00
10	0.021	0.350	1.39	0.028	0.003	18.24	8.05		0.055	658.00	321.00	50.00				87.00
NOTES:		ASOCIACION COLOMBIANA PARA EL AVANCE ENTREGA 303984 WESCO S A		APPROVED CERTIFICATION TEST:												
1.The material described herein is certified for no radiation contamination by original Material Manufacturer.				1.QMS according ISO 9001(TUV Cert No:01 100 126922)												
2.The tolerance of chemical composition is according to ASTM A480				2.SMS according ISO 14001(LR Cert No:0992507)												
3.Visual Inspection(Surface) and Dimension Check: Acceptable.				3.PED (TUV Cert No: 01 202 TWNO-06 0149)												
4.We hereby certify that material described herein has been manufactured and tested with satisfactory results in accordance with the requirement of the above material specification.				4.Lab management system according ISO/IEC 17020(TAF Cert No:00001)												
				5.Lab management system according ISO/IEC 17025(TAF Cert No:2271)												
				 Lai Yu Lin QA Manager / Work Inspector.												
				Q-Y-Q-33-07-C												

Resultados Y Discusión

Composición Química De Los Aceros:

Los datos de la Tabla 6, permiten determinar que el acero estudiado cumple con todas las condiciones químicas elementales para ser considerado una Acero 304, incluso debido a su bajo contenido de carbono, 0,028%, 0,020% y 0,025%, puede clasificarse del grado 304L, que suele preferirse en aplicaciones donde se requiera soldadura para eliminar la formación de carburos de cromo durante el enfriamiento en la zona afectado por el calor, ZAC.

Tabla 3. Análisis químico mediante EOS de los aceros en estudio.

Resultados calibre 16			
Elementos	%p/p	Elemento	%p/p
Carbono (Ca)	0.028	Arsénico (As)	0.00075
Silicio (Si)	0.464	Boro (B)	0.00022
Manganeso (Mn)	1.476	Cobalto (Co)	0.203
Fosforo (p)	0.029	Niobio (Nb)	0.0066
Azufre (S)	0.0054	Plomo (Pb)	0.0042
Cromo (Cr)	18.24	Estaño (Sn)	0.00054
Molibdeno (Mo)	0.064	Titanio (Ti)	0.00085
Níquel (Ni)	8.120	Vanadio (V)	0.170
Cobre (Cu)	0.031	Tungsteno (W)	<0.0020
Aluminio (Al)	<0.00050		
Resultados calibre 18			
Elementos	%p/p	Elemento	%p/p

Carbono (Ca)	0.0020	Arsénico (As)	0.0067
Silicio (Si)	0.506	Boro (B)	0.0011
Manganeso (Mn)	1.315	Cobalto (Co)	0.253
Fosforo (p)	0.029	Niobio (Nb)	0.0046
Azufre (S)	0.0054	Plomo (Pb)	0.0036
Cromo (Cr)	18.12	Estaño (Sn)	<0.00050
Molibdeno (Mo)	0.014	Titanio (Ti)	0.0080
Níquel (Ni)	8.131	Vanadio (V)	0.137
Cobre (Cu)	0.027	Tungsteno (W)	<0.0020
Aluminio (Al)	<0.00050		

Resultados calibre 20

Elementos	%p/p	Elemento	%p/p
Carbono (Ca)	0.025	Arsénico (As)	0.010
Silicio (Si)	0.438	Boro (B)	0.00031
Manganeso (Mn)	1.630	Cobalto (Co)	0.230
Fosforo (p)	0.036	Niobio (Nb)	0.021
Azufre (S)	0.0054	Plomo (Pb)	0.0043
Cromo (Cr)	18.13	Estaño (Sn)	0.0097
Molibdeno (Mo)	0.430	Titanio (Ti)	0.0081
Níquel (Ni)	8.100	Vanadio (V)	0.144
Cobre (Cu)	0.490	Tungsteno (W)	0.055
Aluminio (Al)	<0.00050		

Metalografía De Los Aceros:

Las microfotografías que se presentan en las Figuras 9 a 11, se realizaron en un microscopio a 100 y 500 aumentos:

Figura 9. Fotomicrografías del acero inoxidable 304 calibre 16, ataque con HCl Y H₂O₂. (a) 100 aumentos y ataque por 5 segundos y (b) 500 aumento ataque por 3 segundos.

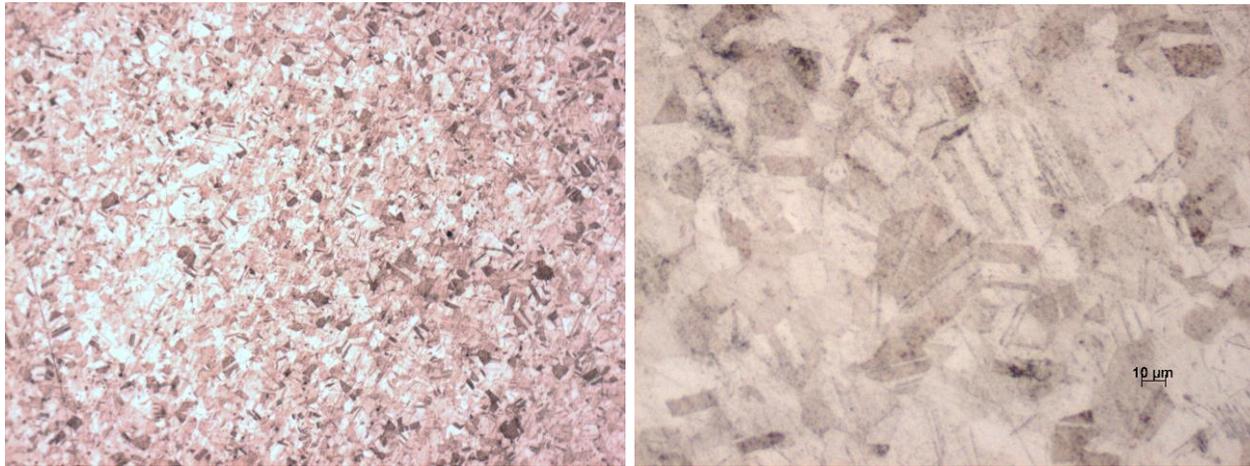


Figura 10. Fotomicrografías del acero inoxidable 304 calibre 18, ataque con HCl Y H₂O₂. (a) 100 aumentos y ataque por 5 segundos y (b) 500 aumento ataque por 3 segundos.

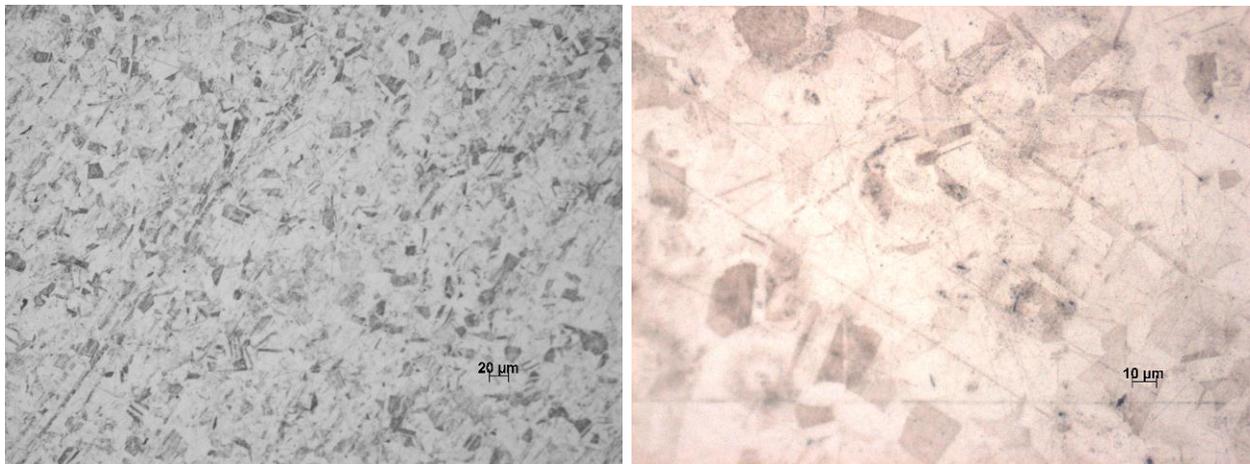
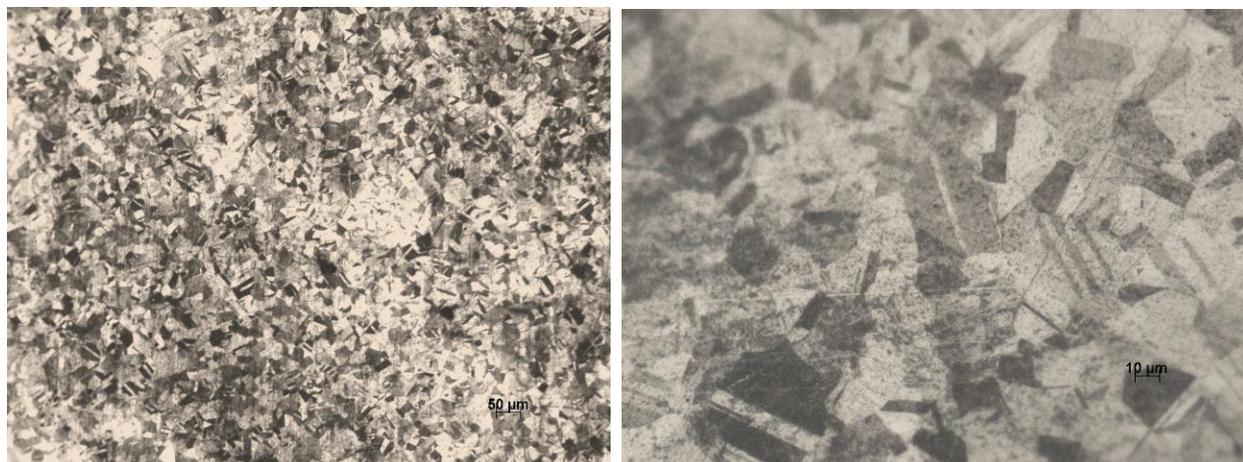


Figura 11. Fotomicrografías del acero inoxidable 304 calibre 20, ataque con HCl Y H₂O₂. (a) 100 aumentos y ataque por 5 segundos y (b) 500 aumento ataque por 3 segundos.



La microestructura en todos los casos está conformada por granos de austenita maclados de tamaño entre 4-5 ASTM, que muestran agrupaciones simétricas. y no se observa una alineación de los granos en la dirección de última laminación, lo que indica que fue sometido a un adecuado proceso de recocido.

Tabla 4. Propiedades mecánicas del acero 304 según la norma ASTM A240 y A466.

Tipo	Límite elástico 0,2 % compensación (KSI)	Resistencia a la tracción (KSI)	% de elongación (longitud de calibre de 2")
Recocido 304	30 min.	75 min.	40 min.
Dureza 304 ¼	75 min.	125 min.	12 min.
Dureza 304 ½	110 min.	150 min.	7 min.
Recocido 304L	25 min.	70 min.	40 min.
Dureza 304L ¼	75 min.	125 mín.	12 min.

Dureza 304L ½	110 mín.	150 mín.	6 min.
---------------	----------	----------	--------

Propiedades A Tracción:

En este capítulo se presentan algunas propiedades mecánicas, que tienen influencia directa o indirecta en la formabilidad y en la calidad de un producto, tales como: Límite elástico convencional del 0.2%, σ_y , (0.2%), resistencia a la tracción (σ_u), y porcentaje de alargamiento hasta fractura con respecto a 50mm de longitud calibrada (A_{50}).

Límite Elástico Convencional, Σ_y (0.2%), Y Resistencia A La Tracción, Σ_u :

En la Tabla 4 se muestran los resultados del límite elástico convencional del 0.2% y la resistencia a la tracción para cada uno de los espesores de lámina según su orientación.

Tabla 5. Límite elástico y resistencia a la tracción para los tres espesores de lámina.

Calibre	Orientación	Resistencia a la tracción (σ_u)	Resistencia a la tracción (σ_u)	Límite elástico (σ_y)	Límite elástico (σ_y)
		Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
		Promedio orientación	Promedio total	Promedio orientación	Promedio total
16 (1.5 mm)	0°	687,1795	666,13	287,29675	286,02
	45°	647,42875		279,762	
	90°	663,791		290,9863333	
18 (1.2 mm)	0°	614,4125	600,63	248,0165	251,16
	45°	588,243		252,5115	
	90°	599,23825		252,95375	
20 (0.9 mm)	0°	549,487	530,22	255,112	253,27

45°	515,40075	251,56275
90°	525,7715	253,1455

Los valores promedio de la resistencia a la tracción de las láminas calibres 16, 18 y 20 son 666.13, 600.63 y 530.22 MPa respectivamente. Todos los resultados están por encima de los límites mínimos (515 y 485 MPa) establecidos para las láminas de acero AISI 304 Y AISI 304L de acuerdo a la norma ASTM A 240 (ASTM A 240, 2020).

En lo que corresponde al límite elástico convencional del 0.2%, σ_y , (0.2%), los valores de resistencia para las láminas calibres 16, 18 y 20 son 286.02, 251.16 y 253.27 MPa respectivamente. Todos los resultados están por encima de los límites mínimos (205 y 170 MPa) establecidos para las láminas de acero AISI 304 Y AISI 304L de acuerdo a la norma ASTM A 240 (ASTM A 240, 2020).

Los valores promedio correspondientes a resistencia a la tracción y límite elástico convencional del acero estudiado, son muy similares a los reportados por Coello y otros para un acero AISI 304 DDQ (calidad de embutición) de 0.8 mm de espesor: 582 y 252 Mpa respectivamente. (J. Coello et al., 2010). A su vez, están un poco por debajo de los reportados por du Toit y steyn para un acero AISI 304 de 0.7 mm de espesor: 662 y 284 MPa respectivamente (Toit y Steyn, 2012).

Alargamiento Hasta Fractura, A50:

El alargamiento hasta fractura es una medida de la ductilidad del material. Por lo anterior está relacionado con la formabilidad de la lámina metálica. (Askeland et al., 2013); (Newel, 2009). En lo referente al porcentaje de alargamiento hasta fractura con respecto a 50 mm de

longitud calibrada, en la Tabla 4 se indican los valores obtenidos en el ensayo a tracción para cada uno de los espesores de lámina estudiados según diversas orientaciones.

Los valores promedio del porcentaje de alargamiento para las láminas de calibres 16, 18 y 20 son 57.38, 58.45 y 63.32 % respectivamente. Todos los resultados están por encima de los límites mínimos (40%) establecidos para las láminas de acero AISI 304 Y AISI 304L de acuerdo a la norma ASTM A 240 (ASTM A 240, 2020).

Los valores promedio correspondientes al alargamiento hasta fractura del acero estudiado, son muy similares a los reportados por du Toit y steyn para un acero AISI 304 de 0.7 mm de espesor: 57% (Toit y Stein, 2012).

Tabla 6. *Valores del alargamiento hasta fractura para los tres espesores de lámina.*

Calibre	Orientación	Alargamiento (A50) %	Alargamiento (A50) %
		Promedio orientación	Promedio total
16 (1.5 mm)	0°	53,925	57,38
	45°	58,26	
	90°	59,955	
18 (1.2 mm)	0°	56,14	58,45
	45°	60,03	
	90°	59,185	
20 (0.9 mm)	0°	59,22	63,32

45°	64,825
90°	65,905

A manera de resumen, en las figuras 12, 13 y 14, se muestran los gráficos comparativos entre la resistencia a la fractura y el porcentaje de alargamiento para los aceros, según su orientación respecto de la dirección de la última laminación. En esta puede verse que, para los tres espesores, las probetas con orientación 0° (en dirección de laminación) obtuvieron la mayor resistencia a la tracción y el menor porcentaje de alargamiento hasta fractura.

Ahora, en la figura 15 se muestra el mismo tipo de gráfico comparando los valores promedios de resistencia a la fractura y el porcentaje de alargamiento para los 3 calibres estudiados. Se puede ver allí, que a mayor espesor de lámina se tiene una mayor resistencia, y a su vez un menor alargamiento. Lo anterior es indicativo del carácter de anisotropía de la lámina.

Figura 12. Diagrama comparativo entre la resistencia a la tracción y el porcentaje de alargamiento para la lámina de acero AISI 304 Calibre 16, según la orientación de las muestras.

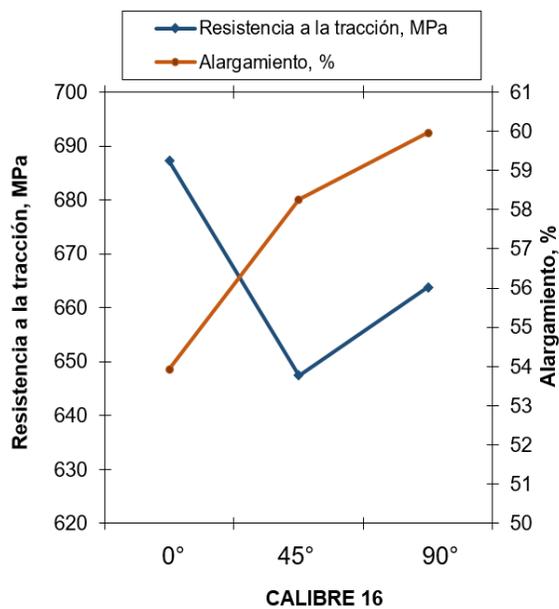


Figura 13. Diagrama comparativo entre la resistencia a la tracción y el porcentaje de alargamiento para la lámina de acero AISI 304 Calibre 18, según la orientación de las muestras.

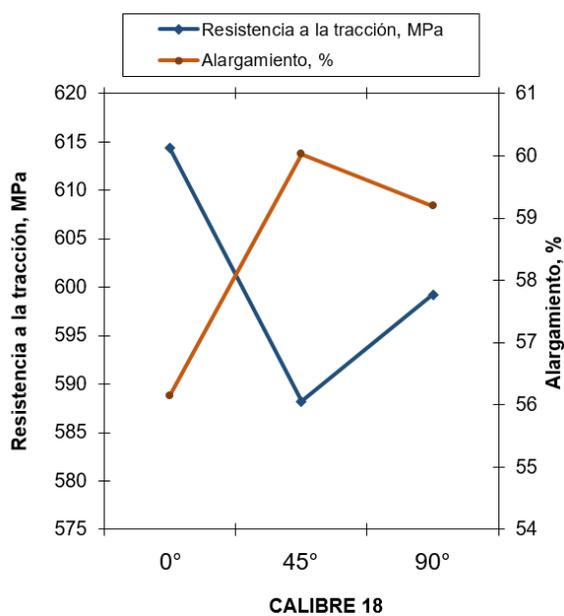


Figura 14. Diagrama comparativo entre la resistencia a la tracción y el porcentaje de alargamiento para la lámina de acero AISI 304 Calibre 20, según la orientación de las muestras.

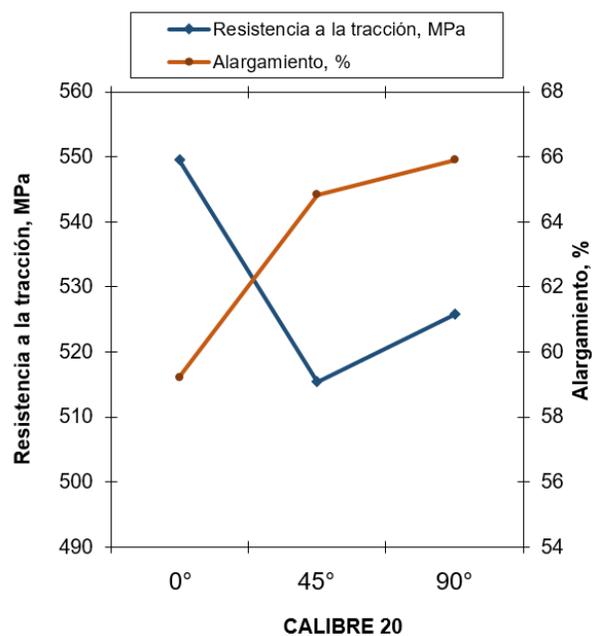
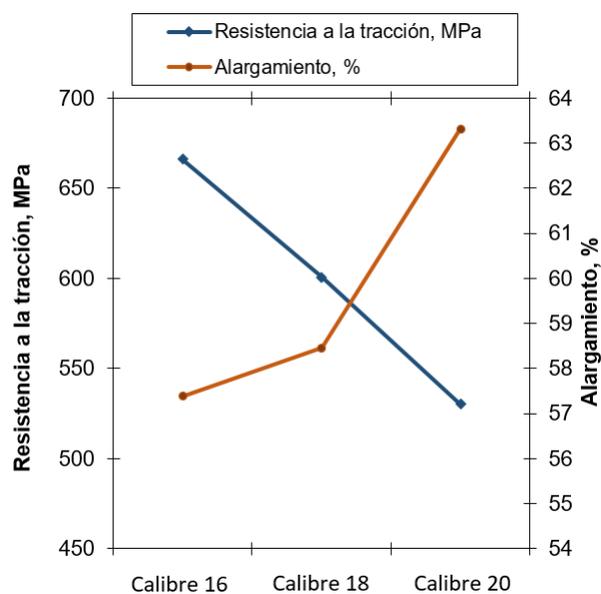


Figura 15. Diagrama comparativo entre valores promedio de la resistencia a la tracción y el porcentaje de alargamiento para la lámina de acero AISI 304 para los calibres 16, 18 y 20.



Exponente De Endurecimiento Por Deformación, n :

El exponente de endurecimiento por deformación mide la rapidez con que un metal se vuelve más resistente y fuerte a causa de la deformación plástica Gedney. (2013). Es decir que, en un material con un valor alto de n , el espesor se reduce más uniformemente en operaciones de estirado y la elongación es más grande antes de aparecer encuellamiento o falla. Lo anterior es un indicador de buena formabilidad (Schey, 2002); (Kalpakjian y Schmid, 2008) & (Askeland et al.,2013).

Los resultados obtenidos de n para los aceros estudiados se indican en la tabla 7, discriminados según el espesor y la orientación respecto a la última dirección de laminación.

Tabla 7. *Valores del exponente de endurecimiento por deformación para los tres espesores de lámina.*

Calibre	Orientación	Exponente, n	Exponente, n
		Promedio orientación	Promedio total
16 (1.5 mm)	0°	0,3808	0,378
	45°	0,37825	
	90°	0,375733333	
18 (1.2 mm)	0°	0,387575	0,370
	45°	0,360425	
	90°	0,363275	
20	0°	0,408575	0,394

(0.9 mm)	45°	0,38215
	90°	0,389925

En la Tabla 7 puede verse que los valores para los tres espesores, y en sus tres orientaciones, son muy similares teniendo promedios de 0.378, 0.370 y 0.394 para los calibres 16, 18 y 20 respectivamente. Aunque para la orientación de 0° en todos los casos tenemos el valor más alto, marcando más diferencia en el calibre 20.

Los valores promedio correspondientes al exponente de endurecimiento por deformación del acero estudiado, son más altos que los reportados por Coello y otros para un acero AISI 304 DDQ (calidad de embutición) de 0.8 mm de espesor: 0.244. (Coello et al., 2010). A su vez, están un poco por debajo de los reportados por du Toit y Steyn para un acero AISI 304 de 0.7 mm de espesor: 0.42 (Toit y Steyn, 2012).

Conclusiones

La formabilidad de las láminas de acero AISI 304 utilizadas por el sector metalmeccánico en Colombia fue estudiada experimentalmente en parte, por medio de su composición química, análisis metalográfico y propiedades mecánicas.

De acuerdo a su composición química, los aceros en estudio se pueden considerar como acero AISI 304 y con su contenido de carbono menor a 0.03% puede clasificarse del grado 304L, que suele preferirse en aplicaciones donde se requiera soldadura para eliminar la formación de carburos de cromo durante el enfriamiento en la zona afectado por el calor, ZAC. Lo anterior coincide con los certificados de calidad suministrados por el fabricante.

En cuanto a las propiedades mecánicas derivadas del ensayo de tracción como la resistencia a la tracción promedio y el límite elástico convencional promedio, se encuentra que a mayor espesor de lámina se obtienen mejores resultados, coincidiendo con lo reportado por el fabricante. También puede verse que, para los tres espesores, las probetas con orientación de 0° (en dirección de laminación) tienen mayor resistencia a la tracción y límite elástico que las de 45° y 90° respectivamente.

En el caso del alargamiento hasta fractura experimentado por las probetas de tracción, se observa que a menor espesor de lámina se tienen mayores resultados. A su vez, los datos mostraron alguna dependencia con la orientación, ya que, para los tres espesores, las probetas con orientación de 0° (en dirección de laminación) tienen menor alargamiento que las de 45° y 90° respectivamente. La dependencia de la resistencia a la tracción y del alargamiento con respecto a la orientación, es indicativo del carácter de anisotropía de la lámina.

En lo referente al exponente de endurecimiento por deformación, n , también se observa que a menor espesor de lámina se tienen mayores resultados. Igualmente, los datos mostraron ligera dependencia con la orientación, ya que, para los tres espesores, las probetas con orientación de 0° (en dirección de laminación) tienen mayor valor del exponente que las de 45° y 90° respectivamente.

De los resultados obtenidos hasta el momento, se puede inferir que, por su mayor espesor y resistencia a la fractura, las láminas de calibre 16 (1.5 mm) tendrán una mejor formabilidad que las de calibre 18 y 20 respectivamente.

Recomendaciones

Continuar con el desarrollo del proyecto global y determinar experimentalmente propiedades como el coeficiente de anisotropía, que dará una idea del comportamiento de las láminas en operaciones de embutido.

Realizar los ensayos correspondientes para construir las curvas límite de formabilidad para cada espesor de lámina en los aceros estudiados.

En cuanto a proyectos futuros para fortalecer la línea de investigación, se recomiendan los siguientes proyectos:

- Desarrollo de un sistema automático de visión artificial para el análisis de deformaciones, con el fin de optimizar la realización de los diagramas límite de formabilidad.
- Desarrollo de un sistema automático de visión artificial para el análisis de deformaciones, con el fin de optimizar la realización de los ensayos para determinar el coeficiente de anisotropía normal.

Referencias Bibliográficas

ASM International. (1996). Metals handbook volume 14 forming and forging. ASM.

ASTM A 240. (2020). Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. ASTM International.

ASTM A 666. (2015). Standard Specification for Annealed or Cold-Worked Austenitic Stainless Steel Sheet, Strip, Plate, and Flat Bar. ASTM International.

ASTM E 3. (2011). Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM International.

ASTM E 517. (2018). Standard Test Methods for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal. ASTM International.

ASTM E 643. (2015). Standard Test Methods for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material. ASTM International.

ASTM E 646. (2016). Standard Test Methods for Tensile Strain Hardening Exponents (n – Values) of Metallic Sheet Materials. ASTM International.

ASTM E 8M. (2013). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]. ASTM International.

ASTM E 2218. (2015). Standard Test Methods for Determining Forming Limit Curves. ASTM International.

- Barbosa, J. E. (2008). Estudio Experimental de la formalidad de chapas de aluminio fabricadas por la empresa Aluminios ONAVA. (Trabajo fin de Master). Universidad Nacional Experimental del Táchira. San Cristóbal, Venezuela.
- Barbosa, J.E., García, I.H, & Fuentes, J. (2009). Estimación vía experimental de la formabilidad de láminas de aluminio de pureza comercial. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 29 (2). Recuperado de: <http://www.rlmm.org/ojs/index.php/rlmm/article/view/24>
- Casadiago, C.L. (2017). Determinación experimental de los límites de formabilidad de la lámina de acero SG295 y SG325, comercializada por la empresa comercial industrial nacional s.a . CINSA, de la ciudad de Cúcuta. (Trabajo fin de Master). Universidad Francisco de Paula Santander UFPS. Cúcuta, Colombia.
- Casadiago, C.L., Barbosa, J.E., & García, I.H. (2017). DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FORMABILIDAD DE LÁMINAS DE ACERO SG295 MEDIANTE SUS PROPIEDADES TENSILES. Revista colombiana de tecnologías de avanzada, 1(29). Recuperado de: http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RCTA/article/view/2480
- D, Askeland. P, Fulay and W, Wright (2013). Ciencia e ingeniería de los materiales, 6° edición. Thomson
- Esteves, A. M. (2003). Evolución de los procesos de corte y deformación de chapa. Hemeroteca. Revista MetalUnivers. Recuperado de: <http://www.interempresas.net/Deformacion-y-chapa/Articulos/8647-Evolucion-de-los-procesos-de-corte-y-deformacion-de-chapa.html>
- Gedney R. (2013). Sheet Metal Testing Guide. ADMET, Inc., Norwood, MA 02062 USA. Recuperado de: <http://admet.com/assets/ADMET-Sheet-Metal-Testing-Guide-July-2013.pdf>

- J. Coello, V. Miguel, A. Calatayud, A. Martínez y C. Ferrer. (2010). Análisis de la deformabilidad del acero inoxidable AISI 304 DDQ en condiciones multiaxiales de embutición. Evaluación de la influencia de la acritud inicial. *Revista de Metalurgia*, 46(5), 435–445. <https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.3989/revmetalm.0967>
- J, Newel (2009). *Ciencia de materiales, aplicaciones en ingeniería*, 1º edición. Alfaomega
- Jong Bong, H. Barlat, F. Lee, M. and Chan Ahn, D. (2012) The forming limit diagram of ferritic stainless steel sheets: Experiments and modeling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 64 (1). Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740312001944>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S.R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y tecnología*. México: Pearson Educación.
- Panich, S. Barlat, F. Uthaisangsuk, V. Suranuntchai, S and Jirathearanat, S. (2013) Experimental and theoretical formability analysis using strain and stress based forming limit diagram for advanced high strength steels. *Materials and Design*. 51(2). Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913004032>
- Roger, A. (2005). *Deformation Characteristics of Stainless Steels*. (Tesis doctoral). Lulea University of Technology, Lulea. Sweden. Recuperado de: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A990918&dswid=-4133>
- Schey, J.A. (2002). *Procesos de Manufactura*, 3ª edición. México: McGraw-Hill

- Talyan, V. Wagoner, R.H. and Lee, J.K. (1998). Formability of Stainless Steel. Metallurgical and Materials Transactions, (29)3. Recuperado de: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11661-998-0041-1#page-1>
- Tekkaya, A. E., & Altan, T. (2012). Sheet Metal Forming: Fundamentals. ASM International. Recuperado de: <http://search.ebscohost.com/bibliotecavirtual.unad.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=513307&lang=es&site=eds-live&scope=site>
- Toit, M., & Steyn, H. (2012). Comparing the Formability of AISI 304 and AISI 202 Stainless Steels. Journal of Materials Engineering & Performance, 21(7), 1491–1495. <https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1007/s11665-011-0044-8>